

Srovnání šedé vodní stopy způsobené běžným znečištěním a mikropolutanty: případová studie ČOV Bandung v Indonésii

LIBOR ANSORGE, LADA STEJSKALOVÁ

Klíčová slova: šedá vodní stopa – čistírna odpadních vod – mikropolutanty – látky vzbuzující obavy – CECs

ABSTRAKT

Šedá vodní stopa představuje hypotetické množství vody potřebné k naředění znečištění ve vodním prostředí na přijatelnou mez „bez účinku“. V této studii se zkoumá šedá vodní stopa tzv. mikropolutantů (někdy označovaných jako látky vzbuzující obavy – Contaminants of Emerging Concern, CECs) v porovnání s běžně monitorovanými látkami, jako jsou živiny a organické znečištění, v odpadních vodách. Byly analyzovány 24hodinové vzorky odebrané z největší čistírny odpadních vod (ČOV) v Indonésii, která používá systém stabilizačních nádrží. Šedá vodní stopa byla vypočítána pro 12 mikropolutantů a šest látek běžně sledovaného znečištění. Nejvyšší hodnotu šedé vodní stopy na odtoku z ČOV měla BSK₅ (13,5 l/l). Nejvyšší hodnotu z mikropolutantů na odtoku z ČOV měl Fluoxetine (0,08 l/l). Při použití jiných publikovaných hodnot PNEC dosáhl Fluoxetine hodnot šedé vodní stopy vyšší než BSK₅. Nejvyšší hodnotu šedé vodní stopy na přítoku na ČOV měl Ibuprofen (210,4 l/l), ale tato látka byla z ČOV účinně odstraněna.

ÚVOD

Vodní stopa se od svého uvedení v roce 2002 [1] stala populárním nástrojem posuzování užívání vody lidskou společností. V obecné rovině představuje vodní stopa posuzovaného produktového systému přímou i nepřímou spotřebu vody pro produkci nějakého výrobku, služby nebo procesu, a to v celém jeho životním cyklu [2]. Vodní stopa se skládá ze tří složek označovaných „barvami“. Modrá vodní stopa představuje množství vody odebrané z vodních zdrojů a spotřebované během životního cyklu posuzovaného produktového systému. Zelená vodní stopa představuje množství dešťových srážek (např. ve formě půdní vody) spotřebovaných během životního cyklu posuzovaného produktového systému. Obvykle je významná v agrosystémech a u potravinářských produktů. A nakonec je šedá vodní stopa, která představuje množství vody potřebné k naředění vypouštěného znečištění během životního cyklu z posuzovaného produktového systému.

Produkce odpadních vod je neodmyslitelně spojena jak s lidskými sídly, tak s průmyslovou výrobou. Pro zajištění environmentálních standardů kvality vod přijímají jednotlivé státy legislativu, která reguluje vypouštění odpadních vod. Tato legislativa obvykle předepisuje takové limity, jež vyvolávají potřebu budování ČOV. Výpočet šedé vodní stopy odpadních vod byl v minulosti předmětem řady studií zaměřených např. na účinnost ČOV [3] či porovnání různých systémů ČOV [4]. Tyto studie se obvykle soustředí na posuzování „běžného“

znečištění vyjádřeného parametry biochemické spotřeby kyslíku (BSK₅), chemické spotřeby kyslíku (CHSK), celkového fosforu (TP) a celkového dusíku (TN). Různé studie pak přidávají i další látky, jako např. dusičnanový dusík [5], celkový kyslík [6] apod.

V posledních letech se v odborné komunitě začala diskutovat otázka tzv. mikropolutantů, tj. látek obvykle antropogenního původu, které se vyskytují v životním prostředí ve velmi nízkých koncentracích a jež jsme schopni detekovat až s příchodem nových detekčních technik, jako je LC-MS/MS [7]. Jejich chování v životním prostředí však není dosud dostatečně prozkoumáno, a proto hrozí riziko nepříznivých účinků těchto látek na životní prostředí a ekosystémy i při velmi nízkých koncentracích. Tyto látky jsou někdy označovány jako emergentní – ve smyslu nové – polutanty či látky/kontaminanty/polutanty vzbuzující obavy (CECs). Typickými představiteli těchto látek jsou farmaka, průmyslové a zemědělské chemikálie, látky osobní péče apod. [8]. Mikropolutantům se věnovalo i několik studií šedé vodní stopy znečištění vypouštěného z ČOV. Těchto studií je zatím spočítatelně málo, jelikož vědci se dosud soustřeďovali zejména na popis výskytu a chování těchto znečišťujících látek v životním prostředí [9, 10].

Pravděpodobně první studií, která kvantifikovala šedou vodní stopu mikropolutantů, je španělská studie 12 ČOV [11]. Tato studie víceméně definovala postup, jak posuzovat mikropolutanty prostřednictvím šedé vodní stopy. Zároveň ovšem poukázala na možnost, že mikropolutanty mohou mít vyšší šedou vodní stopu než běžně sledované znečištění. Toto zjištění nebylo ještě žádnou další studií potvrzeno, ale ani žádná další studie neprokázala, že by zjištění bylo spíše výjimkou. Jedním z důvodů je právě skutečnost, že v odpadních vodách se obvykle nesledují zároveň běžné znečišťující látky i mikropolutanty. Pokud víme, jedinou další studií porovnávající šedou vodní stopu běžných znečišťujících látek a mikropolutantů je studie ČOV Dolní Kralovice v povodí VN Švihov [12], kde však šedá vodní stopa běžných znečišťujících látek výrazně převyšovala hodnoty šedé vodní stopy mikropolutantů. Cílem naší studie je rozšířit zatím velmi skrovnou literaturu zabývající se porovnáním šedé vodní stopy běžných znečišťujících látek a mikropolutantů.

DATA A METODY

Zájmová ČOV

Centrální ČOV Bandung se nachází v Bojongsoang (*obr. 1*) a má efektivní kapacitu 40 000 m³ za den [13]. Jde o největší ČOV v Indonésii. Odpadní vody jsou

vypouštěny do řeky Citarum, největší řeky v provincii Západní Jáva a zároveň jedné z nejznečištěnějších řek v jihovýchodní Asii [14]. Proces čištění na ČOV je dvoustupňový. První stupeň spočívá ve fyzikálních/mechanických procesech zahrnujících česle, síta a primární sedimentaci. Druhý stupeň využívá systém stabilizačních nádrží sestávající z anaerobních, oxidačních a dosazovacích nádrží, v nichž probíhají biologické procesy čištění odpadních vod. Anaerobní a oxidační nádrže jsou určeny ke snížení biochemické spotřeby kyslíku (BSK₅), dosazovací nádrže slouží především pro terciární úpravu [15]. Schéma ČOV Bandung je uvedeno na obr. 2.

Pro tuto studii byla použita data publikovaná v článku o odběru a zpracování vzorků na ČOV Bandung [16]. 24hodinové slévané vzorky analyzované ve studii byly odebírány každou hodinu pomocí vertikálních vzorkovačů do Van Dornových lahví mezi 7:00 18. června 2019 a 6:00 19. června 2019. Pro studii šedé vodní stopy byly použity údaje o kvalitě vod na přítoku do ČOV a na odtoku z ČOV.

Výpočet šedé vodní stopy

Šedá vodní stopa jednotkového objemu odpadní vody se počítá pro každou znečišťující látku pomocí rovnice 1:

$$GWF_i = \frac{L_i}{c_{\max,i} - c_{\text{nat},i}} = \frac{c_i \times Q}{c_{\max,i} - c_{\text{nat},i}} = \frac{c_i}{c_{\max,i} - c_{\text{nat},i}} \quad [l/l] \quad (1)$$

Pro mikropolutanty dojde k úpravě rovnice v souladu s postupem popsaným Martínez-Alcalá [11]:

$$GWF_i = \frac{L_i}{c_{\max,i} - c_{\text{nat},i}} = \frac{c_i \times Q}{PNEC_i - 0} = \frac{c_i}{PNEC_i} \quad [l/l] \quad (2)$$

kde:

GWF_i	je	šedá vodní stopa látky i
L_i		množství vypouštěného znečištění i
$c_{\max,i}$		maximální povolená koncentrace látky i ve vodním prostředí (environmentální standard)
$c_{\text{nat},i}$		přirozená pozadová koncentrace látky i ve vodním prostředí; pro antropogenní látky = 0
c_i		koncentrace látky i v odpadních vodách
Q		průtok vypouštěné odpadní vody; s ohledem na cíle studie byla uvažována hodnota $Q = 1$
$PNEC_i$		koncentrace látky i , pod kterou není předpokládán žádný nepříznivý účinek expozice v ekosystému

Hodnoty předpokládané koncentrace bez účinku byly převzaty z databáze NORMAN [17]. Hodnoty pro c_{\max} a c_{nat} použité pro výpočet dle rovnice 1 i hodnoty PNEC pro výpočet dle rovnice 2 uvádí tab. 1.

Tab. 1. Hodnoty c_{\max} , c_{nat} a PNEC použité pro analýzu
Tab. 1. Values of c_{\max} , c_{nat} and PNEC used in analysis

ID	Parametr/Parameter	Jednotky/Units	PNEC
TMP	Trimethoprim	µg/l	120
SMZ	Sulfamethazine	µg/l	30
ACT	Acetaminophen	µg/l	46
IBU	Ibuprofen	µg/l	0,011
TCS	Triclosan	µg/l	0,11
CBZ	Carbamazepine	µg/l	2
FLX	Fluoxetine	µg/l	0,1
BTA	Benzotriazole	µg/l	19
BPA	Bisphenol A	µg/l	0,24
CAF	Caffeine	µg/l	1,2
DEET	N,N-diethyl-m-toluamide	µg/l	88
TCEP	Tris(2-chloroethyl) phosphate	µg/l	6
TSS	Total Suspended Solids	mg/l	10
BOD	Biochemical Oxygen Demand	mg/l	2
COD	Chemical Oxygen Demand	mg/l	10
TOC	Total Organic Carbon	mg/l	3
TN	Total Nitrogen	mg/l	3
TP	Total Phosphorus	mg/l	0,1
N-NH ₃	Ammonia Nitrogen	mg/l	2,5

Šedá vodní stopa ČOV je určena látkou s nejvyšší hodnotou:

$$GWF = \max [GWF_1, GWF_2 \dots GWF_n] \quad [l/l] \quad (3)$$

kde:

GWF	je	šedá vodní stopa ČOV
GWF_i		šedá vodní stopa látky i na ČOV



Obr. 1. ČOV Bandung
Fig. 1. Bandung WWTP

VÝSLEDKY A DISKUZE

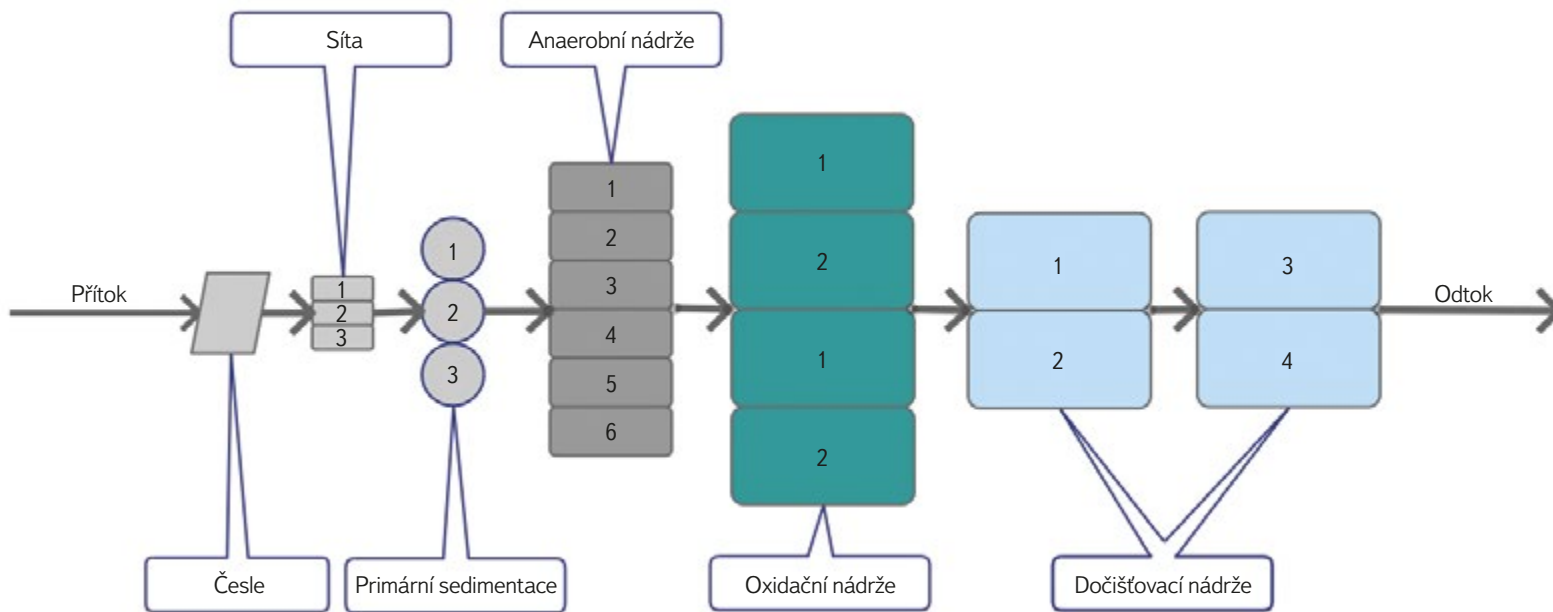
Souhrnné výsledky uvádí *tab. 2*. Nejvyšší hodnotu šedé vodní stopy běžných znečišťujících látek na přítoku do ČOV i odtoku z ČOV má ukazatel BSK_5 , u něhož klesla hodnota GWF z 45 l/l na 13,5 l/l (přítok → odtok). Nepotvrdila se tak zjištění předchozích studií [5, 11], že šedou vodní stopu na odtoku z ČOV obvykle určuje celkový fosfor. Je pravděpodobné, že tento jev je typický pro ČOV založené na systému stabilizačních nádrží, zatímco předchozí studie zkoumaly mechanicko-biologické ČOV. BSK_5 má celkově nejvyšší hodnotu šedé vodní stopy na odtoku ze všech sledovaných látek (*obr. 3*).

Nejvyšší hodnotu na odtoku mělo ze sledovaných mikropolutantů antidepresivum Fluoxetine (0,08 l/l). Celková hodnota jeho šedé vodní stopy je dána zejména nízkou hodnotou PNEC 100 ng/l. V literatuře z nedávné doby lze najít i výrazně přísnější hodnoty, např. 0,0291 ng/l [18] z roku 2022 či 3 ng/l [19] a 10,8 ng/l [20] z roku 2019. V případě PNEC 0,0291 ng/l by hodnota šedé vodní stopy Fluoxetine byla 274,9 l/l, což je 20x vyšší než hodnota šedé vodní stopy běžných znečišťujících látek. Lze potvrdit, že hodnota šedé vodní stopy je mimořádně citlivá na volbu hodnoty PNEC, resp. c_{max} . Zjištění Martínez-Alcalá [11], že mikropolutanty mohou být určující pro celkovou šedou

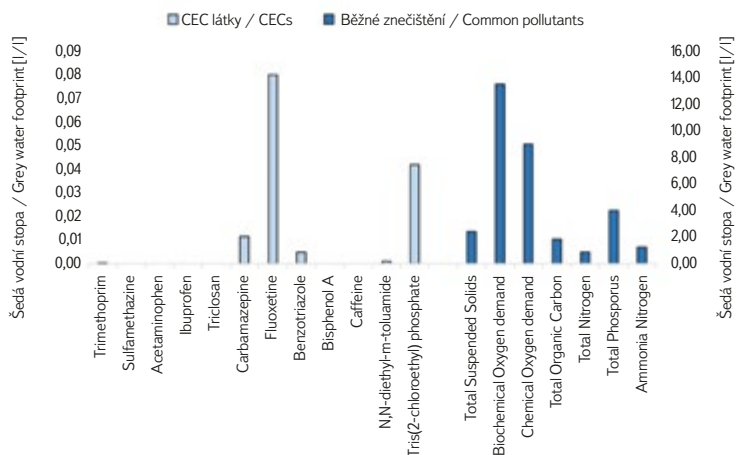
vodní stopu vypouštěného znečištění z ČOV zatím nelze jednoznačně potvrdit. Teprve další výzkum toxicity mikropolutantů ukáže, zda jsou tyto látky i přes svoje minimální koncentrace v odpadních vodách rozhodující pro vodní stopu. Použití PNEC uveřejněných v databázi NORMAN namísto použití jiných hodnot lze doporučit ze tří hlavních důvodů:

1. Jde o hodnoty diskutované odborníky sdruženými v NORMAN.
2. Hodnoty jsou periodicky revidovány/aktualizovány.
3. K dispozici jsou hodnoty pro většinu známých mikropolutantů.

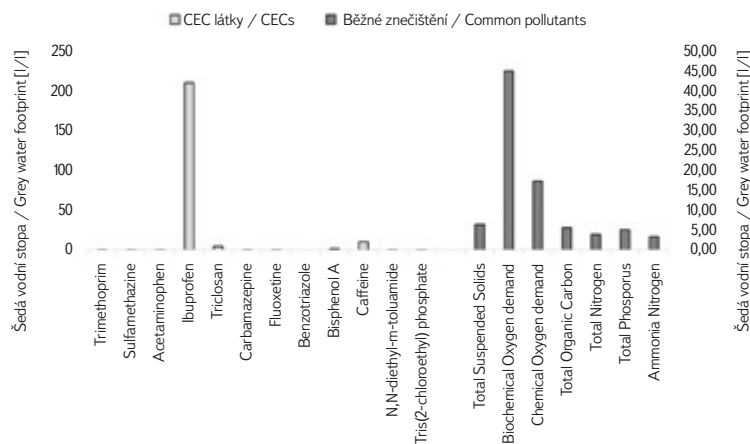
Mírně odlišná situace nastává u nečištěných odpadních vod na přítoku do ČOV (*obr. 4*). Absolutně nejvyšší šedou vodní stopu má Ibuprofen (210,5 l/l), což je způsobeno velkou koncentrací této látky na přítoku do ČOV a zejména mimořádně nízkou hodnotou PNEC 11 ng/l. Podobně nízké hodnoty PNEC však uvádějí i další autoři [19, 21]. Stejně tak potvrzují jiní autoři i vysoké koncentrace Ibuprofenu v komunálních odpadních vodách [22]. Ibuprofen je obvykle velmi dobře odbouráván systémem stabilizačních nádrží, takže na odtoku z ČOV



Obr. 2. Schéma ČOV Bandung
Fig. 2. Diagram of Bandung WWTTP



Obr. 3. Šedá vodní stopa – odtok z ČOV Bandung
Fig. 3. Grey water footprint – Bandung WWTTP effluent



Obr. 4. Šedá vodní stopa – přítok na ČOV Bandung
Fig. 4. Grey water footprint – Bandung WWTTP influent

nebyla tato látka zaznamenána. Vysokou míru odstraňování Ibuprofenu na ČOV potvrzují i další studie [23]. Celková redukce šedé vodní stopy na ČOV tak dosáhla 93,59 %. Taková hodnota redukce nebyla zatím zaznamenána v žádné studii zabývající se redukcí šedé vodní stopy na ČOV.

Tab. 3 zobrazuje porovnání šedé vodní stopy mikropolutantů z různých studií. Vyplývá z ní, že dosavadní studie se velmi liší v rozsahu sledovaných mikropolutantů i v hodnotách jejich šedé vodní stopy. Může to mít řadu důvodů. Jednak to může být způsobeno rozdílnou hodnotou PNEC použitou pro výpočet šedé vodní stopy, dále vysokou variabilitou přítomnosti mikropolutantů v odpadních vodách a nakonec také rozdílnými analytickými metodami použitými pro stanovení mikropolutantů v odpadních vodách. To lze doložit na dvou studiích z evropských ČOV [24, 25], kdy jedna sada vzorků byla analyzována dvěma odlišnými metodami a pro tři látky, které byly analyzovány oběma metodami, jsou k dispozici rozdílné výsledky.

Při interpretaci výsledků studie je třeba uvažovat několik jejích omezení. V první řadě jde o studii založenou na jednodenních vzorcích, která nemusí postihovat časovou variabilitu složení odpadních vod. Dále je třeba vzít v úvahu,

že se jedná o studii ČOV využívající systém stabilizačních nádrží, jenž např. v podmínkách střední Evropy není příliš rozšířený z důvodu vysokých nároků na plochu a nižší efektivity čištění. Za třetí je do studie zahrnuta ČOV v Indonésii, kde panují jiné klimatické podmínky, jež ovlivňují biologické procesy čištění odpadních vod. V neposlední řadě je třeba si uvědomit, že řada mikropolutantů, jako např. farmaka, jsou biologicky aktivní látky, které mají schopnost ovlivnit necílové organismy. Odpadní vody obsahují pestrou směs těchto látek, v nichž mohou jednotlivé mikropolutanty vzájemně reagovat a metabolizovat. Princip šedé vodní stopy je však postaven na myšlence posouzení jednotlivých znečišťujících látek a pro mikropolutanty by bylo vhodnější uvažovat směsí [24, 26].

Tab. 2. Koncentrace a šedá vodní stopa běžného znečištění a mikropolutantů
 Tab. 2. Concentrations and Grey Water Footprint of conventional pollution and micropollutants

ID	Parametr/Parameter	Koncentrace/Concentration			GWF [l/l]	
		Jednotka / Unit	Přítok / Influent	Odtok / Effluent	Přítok / Influent	Odtok / Effluent
TMP	Trimethoprim	ng/l	182	31	0,00	0,00
SMZ	Sulfamethazine	ng/l	25		0,00	
ACT	Acetaminophen	ng/l	9 111		0,20	
IBU	Ibuprofen	ng/l	2 315		210,45	
TCS	Triclosan	ng/l	470		4,27	
CBZ	Carbamazepine	ng/l	12	23	0,01	0,01
FLX	Fluoxetine	ng/l	10	8	0,10	0,08
BTA	Benzotriazole	ng/l		92		0,00
BPA	Bisphenol A	ng/l	378		1,58	
CAF	Caffeine	ng/l	12 220		10,18	
DEET	N,N-diethyl-m-toluamide	ng/l	4 968	82	0,06	0,00
TCEP	Tris(2-chloroethyl) phosphate	ng/l	101	251	0,02	0,04
TSS	Celkové nerozpuštěné látky / Total suspended solids	mg/l	64	24	6,40	2,40
BOD	Biochemická spotřeba kyslíku / Biochemical Oxygen Demand	mg/l	90	27	45,00	13,50
COD	Chemická spotřeba kyslíku / Chemical Oxygen Demand	mg/l	173	90	17,30	9,00
TOC	Celkový organický uhlík / Total Organic Carbon	mg/l	16,8	5,5	5,60	1,83
TN	Celkový dusík / Total Nitrogen	mg/l	11,5	2,6	3,83	0,87
TP	Celkový fosfor / Total Phosphorus	mg/l	0,5	0,4	5,00	4,00
N-NH3	Amoniakální dusík / Ammonia Nitrogen	mg/l	8,4	3,1	3,36	1,24

Tab. 3. Porovnání hodnot v studiích šedé vodní stopy mikropolutantů na ČOV
 Tab. 3. Comparison of values presented in studies of GWF of micropollutants at WWTPs

ID	Parametr/ Parameter	Jednotka/ Unit	Tato studie/ This study		[11]		[12]		[27]#		[28]	
			Přítok/ Influent	Odtok/ Effluent	Přítok/ Influent	Odtok/ Effluent	Přítok/ Influent	Odtok/ Effluent	Přítok/ Influent	Odtok/ Effluent	Přítok/ Influent	Odtok/ Effluent
TMP	Trimethoprim	l/l	0,00	0,00	*	*	-	-	0,00#	0,00#	*	*
SMZ	Sulfamethazine	l/l	0,00	-	*	*	-	-	*	*	*	*
ACT	Acetaminophen	l/l	0,20	-	*	*	*	*	*	*	*	*
IBU	Ibuprofen	l/l	210,45	-	*	*	*	*	0,00#	0,02–0,62#	*	342,36–501,99
TCS	Triclosan	l/l	4,27	-	*	*	*	*	0,06#	-	*	*
CBZ	Carbamazepine	l/l	0,01	0,01	0,47–22,08	1,21–11,75	*	*	0,42–3,62	0,56–6,86	*	0,04–2,31
FLX	Fluoxetine	l/l	0,10	0,08	*	*	*	*	0,06#	0,04#	*	*
BTA	Benzotriazole	l/l		0,00	*	*	*	*	0,00–0,12#	0,01–0,07#	*	*
BPA	Bisphenol A	l/l	1,58	-	*	*	*	*	0,02–0,34#	0,03–0,49#	*	0,01–0,23
CAF	Caffeine	l/l	10,18	-	*	*	*	*	0,82–3,29#	0,01–0,82#	*	1,29–496,62
DEET	N,N-diethyl-m-toluamide	l/l	0,06	0,00	*	*	*	*	0,00#	0,00#	*	*
TCEP	Tris(2-chloroethyl) phosphate	l/l	0,02	0,04	*	*	*	*	0,02–0,08#	0,01–0,08#	*	*

* Látka nebyla ve studii zahrnuta.

- Nedostupná hodnota (obvykle pod mezí stanovitelnosti).

Data nebyla publikována v odkazovaném článku, ale jsou k dispozici na požádání.

ZÁVĚRY

Provedená studie doplňuje dosud velmi skrovnou literaturu porovnávací šedou vodní stopu standardně monitorovaných chemických parametrů s mikropolutanty vypouštěnými z ČOV. Studie potvrdila, že volba hodnoty PNEC je zásadní pro to, zda mikropolutanty mohou být určující pro hodnotu celkové šedé vodní stopy vypouštěného komunálního znečištění. Při použití hodnot PNEC dostupných v databázi NORMAN byly pro hodnotu šedé vodní stopy vyčištěných odpadních vod určující běžné znečišťující látky. Naopak v nečištěné odpadní vodě by mikropolutanty byly dominantní. Při použití hodnot PNEC, jež byly publikovány v posledních letech, by již mikropolutanty byly určujícím znečištěním i na odtoku z ČOV. Další výzkum ekotoxicity mikropolutantů je tak pro hodnocení šedé vodní stopy v praxi zásadní.

Poděkování

Autoři chtějí poděkovat Dr. Maryaně P. Astuty a doc. Lokeshi Padhyeovi z Univerzity v Aucklandu na Novém Zélandu za poskytnutá data. Dále chtějí poděkovat Dr. Haně Novákové z VÚV TGM za přípravu obr. 1.

Střet zájmů

Autoři prohlašují, že nejsou ve střetu zájmů.

Literatura

- [1] HOEKSTRA, A. Y., HUNG, P. Q. *Virtual Water Trade – A Quantification of Virtual Water Flows between Nations in Relation to International Crop Trade* [on-line]. 12. Delft, The Netherlands: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2002. *Value of Water Research Report Series*. Dostupné z: https://waterfootprint.org/media/downloads/Report11_1.pdf
- [2] HOEKSTRA, A. Y., CHAPAGAIN, A. K., ALDAYA, M. M., MEKONNEN, M. M. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. London, Washington, DC: Earthscan, 2011. ISBN 978-1-84971-279-8.
- [3] GÓMEZ-LLANOS, E., DURÁN-BARROSO, P., MATÍAS-SÁNCHEZ, A. Management Effectiveness Assessment in Wastewater Treatment Plants Through a New Water Footprint Indicator. *Journal of Cleaner Production* [on-line]. 2018, 198, s. 463–471. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.062
- [4] ROMEIKO, X. X. Comprehensive Water Footprint Assessment of Conventional and Four Alternative Resource Recovery Based Wastewater Service Options. *Resources, Conservation and Recycling* [on-line]. 2019, 151, 104458. ISSN 0921-3449. Dostupné z: doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104458
- [5] ANSORGE, L., STEJSKALOVÁ, L., DLALAB, J. Effect of WWTP Size on Grey Water Footprint - Czech Republic Case Study. *Environmental Research Letters* [on-line]. 2020, 15(10), 104020. ISSN 1748-9326. Dostupné z: doi: 10.1088/1748-9326/aba6ae
- [6] MORERA, S., COROMINAS, L., POCH, M., ALDAYA, M. M., COMAS, J. Water Footprint Assessment in Wastewater Treatment Plants. *Journal of Cleaner Production* [on-line]. 2016, 112, s. 4 741–4 748. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.102
- [7] KÜMMERER, K. Emerging Contaminants versus Micro-pollutants. *CLEAN – Soil, Air, Water* [on-line]. 2011, 39(10), s. 889–890. ISSN 1863-0669. Dostupné z: doi: 10.1002/clen.20110002
- [8] VLADIMIROVA, I., PAVLOVA, A., HRANILOVIC, M., DELLA LIBERA, C., KUULIALA, V. (eds.). *Micropollutants in the Water Systems: A Contribution to the Zero Pollution Action Plan from the Research & Innovation Perspective* [on-line]. B. m.: Publications Office of the European Union, 2022. ISBN 978-92-76-48980-1. Dostupné z: doi: 10.2777/174526
- [9] HAWASH, H. B., MONEER, A. A., GALHOUM, A. A., ELGARAHY, A. M., MOHAMED, W. A. A., SAMY, M., EL-SEEDI, H. R., GABALLAH, M. S., MUBARAK, M. F., ATTIA, N. F. Occurrence and Spatial Distribution of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Aquatic Environment, their Characteristics, and Adopted Legislations. *Journal of Water Process Engineering* [on-line]. 2023, 52, 103490. ISSN 2214-7144. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jwpe.2023.103490
- [10] SAIDLULU, D., GUPTA, B., GUPTA, A. K., GHOSAL, P. S. A Review on Occurrences, Eco-Toxic Effects, and Remediation of Emerging Contaminants from Wastewater: Special Emphasis on Biological Treatment Based Hybrid Systems. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [on-line]. 2021, 9(4), 105282. ISSN 2213-3437. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jece.2021.105282
- [11] MARTÍNEZ-ALCALÁ, I., PELLICER-MARTÍNEZ, F., FERNÁNDEZ-LÓPEZ, C. Pharmaceutical Grey Water Footprint: Accounting, Influence of Wastewater Treatment Plants and Implications of the Reuse. *Water Research* [on-line]. 2018, 135, s. 278–287. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi: 10.1016/j.watres.2018.02.033
- [12] STEJSKALOVÁ, L., ANSORGE, L., ROSENDORF, P., FIALA, D., CHERNYSH, Y., KŮLOVÁ, A. Šedá vodní stopa komunálního znečištění se zaměřením na antibiotika – od přítokových vod na ČOV po stav v recipientu. In: *12. biennální konference s mezinárodní účastí Odpadové vody 2022: Zborník prednášok a posterov 12. biennálnej konferencie s mezinárodnou účasťou Odpadové vody 2022*. Bratislava: Asociácia čistiarenských expertov SR, 2022, s. 400–405. ISBN 978-80-973196-3-2.
- [13] MULYANA, W., SUGANDA, E. Water Governance for Urban Resilience Analysis of Key Factors and the Role of Stakeholders in Metropolitan Area. *The Indonesian Journal of Planning and Development* [on-line]. 2017, 2(1), s. 11–18. ISSN 2442-983X. Dostupné z: doi: 10.14710/ijpd.2.11-18
- [14] HAIRAN, M. H., JAMIL, N. R., LOOI, L. J., AMAL AZMAI, M. N. The Assessment of Environmental Flow Status in Southeast Asian Rivers: A Review. *Journal of Cleaner Production* [on-line]. 2021, 295, 126411. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126411
- [15] KURNIAWAN, K. I. A., PUTRA, A. S., ISHIZAKI, R., RANI, D. S., RAHMAH, D. M., AL HUSNA, S. N., AHAMED, T., NOGUCHI, R. Life Cycle Assessment of Integrated Microalgae Oil Production in Bojongsoang Wastewater Treatment Plant, Indonesia. *Environmental Science and Pollution Research* [on-line]. 2024, 31(5), s. 7 902–7 933. ISSN 1614-7499. Dostupné z: doi: 10.1007/s11356-023-31582-6
- [16] ASTUTI, M. P., NOTODARMOJO, S., PRIADI, C. R., PADHYE, L. P. Contaminants of Emerging Concerns (CECs) in a Municipal Wastewater Treatment Plant in Indonesia. *Environmental Science and Pollution Research* [on-line]. 2023, 30(8), s. 21 512–21 532. ISSN 1614-7499. Dostupné z: doi: 10.1007/s11356-022-23567-8
- [17] DULIO, V., KOSCHORRECK, J., VAN BAVEL, B., VAN DEN BRINK, P., HOLLENDER, J., MUNTJE, J., SCHLABACH, M., AALIZADEH, R., AGERSTRAND, M., AHRENS, L., ALLAN, I., ALYGIZAKIS, N., BARCELO, D., BOHLIN-NIZZETTO, P., BOUTROUP, S., BRACK, W., BRESSY, A., CHRISTENSEN, J. H., CIRKA, L., COVACI, A., DERKSEN, A., DEVILLER, G., DINGEMANS, M. M. L., ENGWALL, M., FATTA-KASSINOS, D., GAGO-FERRERO, P., HERNÁNDEZ, F., HERZKE, D., HILSCHEKOVÁ, K., HOLLERT, H., JUNGHANS, M., KASPRZYK-HORDERN, B., KEITER, S., KOOLS, S. A. E., KRUIVE, A., LAMBROPOULOU, D., LAMOREE, M., LEONARDS, P., LOPEZ, B., LÓPEZ DE ALDA, M., LUNDY, L., MAKOVINSKÁ, J., MARIGÓMEZ, I., MARTIN, J. W., MCHUGH, B., MIÈGE, C., O'TOOLE, S., PERKOLA, N., POLESSELLO, S., POSTHUMA, L., RODRIGUEZ-MOZAZ, S., ROESSINK, I., ROSTKOWSKI, P., RUEDEL, H., SAMANIPOUR, S., SCHULZE, T., SCHYMANSKI, E. L., SENGL, M., TARÁBEK, P., TEN HULSCHER, D., THOMAIDIS, N., TOGOLA, A., VALSECCHI, S., VAN LEEUWEN, S., VON DER OHE, P., VORKAMP, K., VRANA, B., SLOBODNIK, J. The NORMAN Association and the European Partnership for Chemicals Risk Assessment (PARC): Let's Cooperate! *Environmental Sciences Europe* [on-line]. 2020, 32(1), 100. ISSN 2190-4715. Dostupné z: doi: 10.1186/s12302-020-00375-w
- [18] FAN, H., WANG, Y., LIU, X., WANG, Y. Y. L., KAZMI, S. S. U. H., OHORE, O. E., LIU, W., WANG, Z. Derivation of Predicted No-Effect Concentrations for Thirty-Five Pharmaceuticals and Personal Care Products in Freshwater Ecosystem. *Frontiers in Marine Science* [on-line]. 2022, 9. ISSN 2296-7745. Dostupné z: doi: 10.3389/fmars.2022.1043792
- [19] ZHOU, S., DI PAOLO, C., WU, X., SHAO, Y., SEILER, T.-B., HOLLERT, H. Optimization of Screening-Level Risk Assessment and Priority Selection of Emerging Pollutants – The Case of Pharmaceuticals in European Surface Waters. *Environment International* [on-line]. 2019, 128, s. 1–10. ISSN 0160-4120. Dostupné z: doi: 10.1016/j.envint.2019.04.034
- [20] FERNÁNDEZ-RUBIO, J., RODRÍGUEZ-GIL, J. L., POSTIGO, C., MASTROIANNI, N., LÓPEZ DE ALDA, M., BARCELÓ, D., VALCÁRCEL, Y. Psychoactive Pharmaceuticals and Illicit Drugs in Coastal Waters of North-Western Spain: Environmental Exposure and Risk Assessment. *Chemosphere* [on-line]. 2019, 224, s. 379–389. ISSN 00456535. Dostupné z: doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.02.041
- [21] HUANG, Q., BU, Q., ZHONG, W., SHI, K., CAO, Z., YU, G. Derivation of Aquatic Predicted No-Effect Concentration (PNEC) for Ibuprofen and Sulfamethoxazole Based on Various Toxicity Endpoints and the Associated Risks. *Chemosphere* [on-line]. 2018, 193, s. 223–229. ISSN 0045-6535. Dostupné z: doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.11.029
- [22] SALGADO, R., NORONHA, J. P., OEHMEN, A., CARVALHO, G., REIS, M. A. M. Analysis of 65 Pharmaceuticals and Personal Care Products in 5 Wastewater Treatment Plants in Portugal Using a Simplified Analytical Methodology. *Water Science and Technology* [on-line]. 2010, 62(12), s. 2 862–2 871. ISSN 0273-1223. Dostupné z: doi: 10.2166/wst.2010.985
- [23] KUMAR, M., SILORI, R., MAZUMDER, P., TAUSEEF, S. M. Screening of Pharmaceutical and Personal Care Products (PPCPs) along Wastewater Treatment System Equipped with Root Zone Treatment: A Potential Model for Domestic Waste Leachate Management. *Journal of Environmental Management* [on-line]. 2023, 335, 117494. ISSN 0301-4797. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117494
- [24] FINCKH, S., BECKERS, L.-M., BUSCH, W., CARMONA, E., DULIO, V., KRAMER, L., KRAUSS, M., POSTHUMA, L., SCHULZE, T., SLOOTWEG, J., VON DER OHE, P. C., BRACK, W. A Risk Based Assessment Approach for Chemical Mixtures from Wastewater Treatment Plant Effluents. *Environment International* [on-line]. 2022, 164, 107234. ISSN 0160-4120. Dostupné z: doi: 10.1016/j.envint.2022.107234
- [25] FINCKH, S., BUCHINGER, S., ESCHER, B. I., HOLLERT, H., KÖNIG, M., KRAUSS, M., LEEKITRATANAPISAN, W., SCHIWY, S., SCHLICHTING, R., SHULIAKEVICH, A., BRACK, W. Endocrine Disrupting Chemicals Entering European Rivers: Occurrence and Adverse Mixture Effects in Treated Wastewater. *Environment International* [on-line]. 2022, 170, 107608. ISSN 0160-4120. Dostupné z: doi: 10.1016/j.envint.2022.107608
- [26] BACKHAUS, T., FAUST, M. Predictive Environmental Risk Assessment of Chemical Mixtures: A Conceptual Framework. *Environmental Science & Technology* [on-line]. 2012, 46(5), s. 2 564–2 573. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi: 10.1021/es2034125
- [27] ANSORGE, L., STEJSKALOVÁ, L., SOLDÁN, P. Emerging Contaminants in Wastewater – Results of Joint Danube Survey 4 Evaluated Via the Grey Water Footprint. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* [on-line]. 2024, 66(1), s. 38–45. ISSN 0322-8916, 1805-6555. Dostupné z: doi: 10.46555/VTEI.2023.11.002
- [28] ANSORGE, L., STEJSKALOVÁ, L., SOLDÁN, P. Grey Water Footprint of Contaminants of Emerging Concern from Wastewater in Sava River Basin. *Acta Hydrotechnica* [on-line]. 2022, 35(63), s. 117–128. ISSN 1581-0267. Dostupné z: doi: 10.15292/acta.hydro.2022.09

Autoři

Ing. Libor Ansoerge, Ph.D.

✉ libor.ansorge@vuv.cz

ORCID: 0000-0003-3963-8290

Mgr. Lada Stejskalová

✉ lada.stejskalova@vuv.cz

ORCID: 0000-0003-2271-7574

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

Príspevek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2024.05.001

ISSN 0322-8916 © 2024 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

COMPARISON OF THE GREY WATER FOOTPRINT OF CONVENTIONAL POLLUTION AND MICROPOLLUTANTS: A CASE STUDY OF THE BANDUNG WWTP (INDONESIA)

ANSORGE, A.; STEJSKALOVÁ, L.

T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague

Keywords: grey water footprint – wastewater treatment plant – micropollutants – contaminants of emerging concern – CECs

Grey water footprint refers to the amount of water required to dilute pollutants released into the aquatic environment to that the water quality remains above agreed water quality standards. This study examines the grey water footprint

of micropollutants, referred also as contaminants of emerging concern (CECs), compared to commonly monitored water parameters (such as nutrients and organic pollution) in wastewater. There were analysed 24-hour samples taken from Indonesia's largest WWTP, which uses a stabilization pond system for wastewater treatment. The grey water footprint was calculated for 12 micropollutants and 6 parameters of standard chemical monitoring. The highest value of the grey water footprint in the WWTP effluent had BOD₅ (13.5 l/l). The highest value among the micropollutants in the WWTP effluent had Fluoxetine (0.08 l/l). When using other published PNEC values, Fluoxetine reached higher grey water footprint values than BOD₅. The highest value of the grey water footprint in the WWTP influent had Ibuprofen (210.4 l/l), but this substance was effectively removed in the WWTP. The study highlights the importance of monitoring micropollutants in wastewater and further ecotoxicity research.

